

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.01.005

烟火式气体发生器燃烧过程的数值模拟和试验研究^{*}

刘 伟^{①②} 陈 樊^{①②} 石俊涛^{①②} 姚 俊^{①②} 屈 纯^{①②} 张 宁^{①②}

①航天科技集团公司四院四十二研究所(湖北襄阳,441003)
②湖北省应急救生与安全防护重点实验室(湖北襄阳,441003)

[摘 要] 建立了理论模型模拟烟火式气体发生器的燃烧过程,基于质量守恒、能量守恒、气体状态方程、气体发生剂的几何燃烧规律以及小孔气体流量规律,还考虑了与过滤网以及壳体的散热损失,获得了数值模拟的内压曲线和压力罐曲线,并与试验结果进行对比分析,证实了模拟结果的准确性。结果表明:燃速压力指数越大,发生器达到最大内压的时间越短,最大压力越高;气体发生剂厚度越小,发生器压力上升越快,最大压力越高,达到最大压力的时间越短;装药量越大,发生器压力上升得越快,最大压力越高,达到最大压力的时间越短;排气孔直径越大,最大压力越小,达到最大压力的时间越长。为烟火式气体发生器的设计提供了理论依据。

[关键词] 烟火式;气体发生器;燃烧过程;数值计算

[分类号] TJ45;TQ567.8

Numerical Simulation and Experimental Study on the Combustion Process for a Pyrotechnic Airbag Inflator

LIU Wei^{①②}, CHEN Fan^{①②}, SHI Juntao^{①②}, YAO Jun^{①②}, QU Chun^{①②}, ZHANG Ning^{①②}
① 42nd Institute of the Forth Academy of CASC (Hubei Xiangyang, 441003)
② Key Laboratory of Emergency Safety and Rescue Technology of Hubei Province (Hubei Xiangyang, 441003)

[ABSTRACT] A theoretical model was proposed to simulate the combustion process in a pyrotechnic airbag inflator. It was based on mass, energy conservation equations, ideal gas equation of state, geometry combustion law of propellant and flowrate law of small gas vent. Heat transfer between the gas and the walls of the combustion chamber and the filter was also considered. Internal pressure curves and tank pressure curves were obtained. Numerical simulation results were compared with experiments to ensure the accuracy of the model. Results show that higher burning rate causes shorter time to reach the maximum pressure and higher maximum pressure. Thinner gas generator results in higher rising rate of pressure, shorter time reaching the maximum pressure and higher maximum pressure. The lager gas generator charge mass results it reaches the maximum pressure more quickly and higher maximum pressure while the larger nozzle area results in the maximum pressure more slowly and lower maximum pressure. It can provide references to design and research of the pyrotechnic airbag inflators.

[KEYWORDS] pyrotechnic; airbag inflator; combustion processes; numerical simulation

前言

近些年来,随着汽车制造业的不断发展,汽车保有量连年增长,道路交通事故也呈现出逐年上升的趋势,安全气囊系统则成为了在汽车交通事故中对驾乘人员最有效的保护设施。根据大量的试验以及交通事故的数据统计,1984年,汽车碰撞安全标准

(FMVSS208)在美国经多次废除后又重新被认可,并开始实施。其中规定,从1995年9月1日以后制造的轿车前排座前均应装备安全气囊,还要求1998年以后的轿车都装备驾驶员和乘客用的安全气囊。安全气囊系统(SRS)由传感器、控制器、气体发生器、气囊等部分组成。安全气囊系统的工作过程随着子系统的变化而有所不同。因此,要评价一个安全气囊系统的综合性能是比较困难的。就此而

^{*} 收稿日期:2016-03-22
作者简介:刘伟(1989-),男,硕士研究生,研究方向为安全气囊气体发生器。E-mail:368129967@qq.com
通信作者:姚俊(1973-),男,研究员,硕士研究生,研究方向为安全气囊气体发生剂/器。E-mail:inflatorglobal@163.com

言,理论模型和数值模拟可以提供很大的帮助^[1]。

过去已经有一些关于烟火式气体发生器燃烧和展开过程理论建模的研究工作。1988 年,Wang 和 Nefske 基于罐压试验数据,利用平均温度法来计算发生器的气体质量流量^[2];计算出来的气体质量流量数据输入到 CAL3D 程序,分析驾驶员安全气囊系统;在平均温度法中,气体发生器的温度在罐压试验过程里被认为是常数,然后与压力罐的能量方程、守恒方程一起来估算发生器的质量流量。1989 年,Wang 等^[3]提议使用双压法来代替平均温度法以提高计算的准确性,特别是用于大排气孔或者空隙率较高的发生器;在这种方法中,使用了相反的气体动力学原理,利用标准的发生器进行罐压试验来进行流量计算。这两个研究都是以设计乘客约束系统为目的的,仅仅把气体发生器当做乘客约束系统的一个子系统而没有去研究其内部的具体工作过程。

Meterna^[4]建立了一个理论模型来模拟烟火式气体发生器的燃烧、传热、过滤、流动以及热力学过程;这项研究首先指出了过滤网过滤与传热过程的重要性,并对其进行了模拟。Butler 等^[5]对乘客侧安全气囊气体发生器燃烧的短暂热化学过程进行了计算机模拟。Butler 等^[6]还论证了预充气体的混合式发生器的优点。

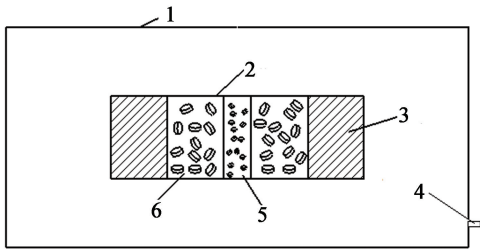
笔者工作的目的是开发一种理论模型和数值计算程序,模拟烟火式气体发生器在内压及罐压试验中的燃烧和充气过程。理论模型是建立在燃烧室和泄压罐瞬间的质量、组分以及能量守恒方程基础上的。利用内弹道学理论对发生器的整个工作过程进行模拟,利用气体发生剂的形状函数以及几何燃烧规律,把气体发生剂的燃烧过程与燃烧室压力的变化联系起来,并且考虑了点火能量的输入以及气体发生剂燃气与过滤网、壳体的对流散热等因素。此模型及数值程序对于评定发生器性能、气体发生剂的性质和发生器硬件结构尺寸等不同设计参数的敏感性有非常重要的作用。有了对这种敏感度的理解,就可以对发生器进行更好的改造,提升其性能。此模型和计算程序另一个作用就是与发生器的充气过程耦合来分析气囊气袋的展开过程。在这种耦合模型当中,气体发生器的设计参数对于气袋展开过程的影响就可以清楚地表现出来了。

1 模型

1.1 假设

如图 1 所示,在烟火式气体发生器模型中,气体

发生器放置在一个固定体积的泄压罐体中,点火管位于气体发生器的中心位置,用于点燃气体发生剂,并开始充气,气体发生剂燃烧产生的气体通过过滤网后排入泄压罐中。



1 - 泄压罐;2 - 发生器;3 - 过滤网;
4 - 传感器;5 - 点火管;6 - 燃烧室。

图 1 烟火式气体发生器燃烧的过程

Fig. 1 Sketch map of combustion processes of the pyrotechnic airbag inflator

由于气体发生器的实际工作是极短时间的非定常过程,并且各个部分前后关联,相互影响,这给数值模拟带来困难。为了便于计算,作假设如下:

- 1) 气体发生剂的燃烧为瞬间全燃面点燃,燃烧符合几何燃烧规律;
- 2) 在燃烧室内和泄压罐内的气体是瞬间完全均匀混合的;
- 3) 点火药剂的燃烧作为一个源项,其规律通过试验来确定;
- 4) 燃烧固体残渣的影响用经验修正系数 a_1 、 a_2 来修正;
- 5) 气体发生剂燃气组分不变,且气体发生剂燃烧产生气体的热力学参数保持为常量^[7-9]。

1.2 守恒方程

燃烧室和泄压罐的瞬态守恒方程如下^[10]。

1) 燃烧室质量守恒方程

$$\frac{dm_c}{dt} = a_1 \rho_p A_b r_b - \dot{m}_g + \dot{m}_i。$$
 (1)

式中: m_c 为燃烧室质量,kg; t 为时间,s; a_1 为气体质量修正系数; ρ_p 为气体发生剂密度,kg/m³; A_b 为气体发生剂瞬时总燃面面积,m²; r_b 为气体发生剂燃速,mm/s; \dot{m}_g 为流出燃烧室的气体质量流量,kg/s; \dot{m}_i 为流入燃烧室的点火质量流量,kg/s。

其中,根据小孔流量规律^[11],当未达到临界状态时,即 $p_2/p_1 > 0.573$ 时,

$$\dot{m}_g = AC_d \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} p_1 \rho_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}。$$
 (2)

式中: A 为排气孔总面积,m²; C_d 为小孔流量系数; γ 为燃气比热比; p_1 为燃烧室压力,Pa; ρ_1 为燃烧室燃气密度,kg/m³; p_2 为泄压罐压力,Pa。

达到临界状态时,即 $p_2/p_1 \leq 0.573$ 时,

$$\dot{m}_g = AC_d \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} p_1 \rho_1 \quad (3)$$

点火质量流量当做一源项,假定有一定的释放规律,由试验测定。

2) 燃烧室能量守恒方程

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{C_v m_c} [a_2 \rho_p A_b r_b h_p - \dot{m}_g h_g + \dot{m}_i h_i - q_c] \quad (4)$$

式中: T_c 为燃烧室燃气温度, K; C_v 为气体发生剂燃气定容比热, J/(kg · K); a_2 为气体能量修正系数; ρ_p 为气体发生剂密度, kg/m³; A_b 为气体发生剂瞬时总燃面面积, m²; h_p 为气体发生剂潜能, J/kg; h_g 为排出燃烧室气体内能, J/kg; h_i 为点火气体焓值, J/kg; q_c 为燃烧室散热热流量, W。

3) 泄压罐质量守恒方程

$$\frac{dm_t}{dt} = \dot{m}_g \quad (5)$$

式中: m_t 为泄压罐质量。

4) 泄压罐能量守恒方程

$$\frac{dT_t}{dt} = \frac{1}{C_v m_t} [\dot{m}_g h_g - q_t] \quad (6)$$

式中: T_t 为泄压罐燃气温度; q_t 为泄压罐散热热流量, W。

5) 几何燃烧规律方程

$$\frac{d\delta}{dt} = r_b \quad (7)$$

式中: δ 为气体发生剂已燃厚度, mm; r_b 为气体发生剂燃速, mm/s, $r_b = ap^n$ 。

不同气体发生剂的压力指数 n 与指前因子 a 通常是通过密闭爆发器试验或者药条燃烧试验测得的,本文中,采用密闭爆发器试验测得气体发生剂的燃速。

6) 气体状态方程

$$p = \rho RT \quad (8)$$

式中: p 为气体压力, Pa; ρ 为气体密度, kg/m³; R 为气体常数, J/(kg · K); T 为气体温度, K。

燃气与燃烧室壁以及泄压罐之间的传热当做对流换热,利用马蒙卡夫经验公式来计算:

$$q = CW_p \rho (T - T_w) F = \alpha (T - T_w) F \quad (9)$$

式中: q 为对流换热流量, kW; C 为燃气定容比热, kJ/(kg · K); W_p 为气体平均撞击速度, m/s; T_w 为壁面温度, K; F 为气体与壁面接触面积, m²; $\alpha = \alpha_0 \rho$, α_0 一般取 0.21 ~ 0.42 (kJ · m)/(s · K · kg)。

燃气与过滤网之间的传热对于计算排出气体发

生器的燃气温度非常重要。在充气过程中,过滤网同样起到了冷却燃气的作用,使得高温燃气冷却到安全的程度,以防止烧坏气袋。本文中,过滤网被当做多孔介质来处理,且气体和过滤网之间的热交换与气体速度有关,如下式:

$$N_u = \frac{hL}{k} = c_1 Re^{c_2} Pr^{c_3} \quad (10)$$

式中: N_u 为努赛尔数; h 为对流换热系数, W/(m² · K); L 为特征长度; k 为热导率, W/(m · K); Re 为雷诺数; Pr 为普朗克数; c_1 , c_2 和 c_3 分别取 2/5、2/3、1/3, 为经验常数。

上述理论模型的求解是通过基于四阶龙格-库塔方法的数值程序来完成的,龙格-库塔方法是一种工程上应用广泛的解微分方程的高精度单步算法,由于此算法精度高,采取措施对误差进行抑制,所以其实现原理也较复杂。对于微分方程初值问题: $y' = f(x, y)$, $y(x_0) = y_0$, 经数学推导、求解,可得出四阶龙格-库塔公式,也就是在工程中应用广泛的经典龙格-库塔算法:

$$y(i+1) = y(i) + \frac{h(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)}{6} \quad (11)$$

式中: h 为间隔步长; $K_1 = f[x(i), y(i)]$; $K_2 = f[x(i) + h/2, y(i) + hK_1/2]$; $K_3 = f[x(i) + h/2, y(i) + hK_2/2]$; $K_4 = f[x(i) + h, y(i) + hK_3]$ 。

下一个值 $y(i+1)$ 由现在的值 $y(i)$ 加上间隔步长 h 和一个估算的斜率的乘积决定。该估算斜率是斜率 K_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 的加权平均值。四阶龙格-库塔法每步的误差是 h^5 阶,而总积累误差为 h^4 阶。

气体发生剂燃烧产生气体的热力学参数通过输入组分由 Real 软件模拟得出,将数值模拟结果与试验进行对比来检验其准确性。

2 结果和讨论

2.1 计算结果与试验数据的对比

为了验证理论模型和计算机程序的准确性,需要把计算结果和 60 L 压力罐试验的结果进行对比。在试验中,发生器内压和压力罐罐压的压力-时间曲线由压电式压力传感器测得。计算结果与试验结果的对比如图 2、图 3 所示,可以看出,模拟结果与试验曲线符合得较好。

图 2 是气体发生器内压的计算结果和试验结果的比较情况。在初始阶段,燃烧室内压力上升速率很快,这主要是由于点火器的质量和能量输入。当

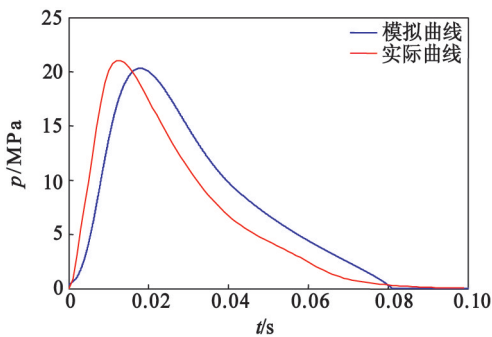


图 2 燃烧室内压试验曲线与模拟曲线对比
Fig.2 Comparison of simulated interior ballistic curve and experimental curve

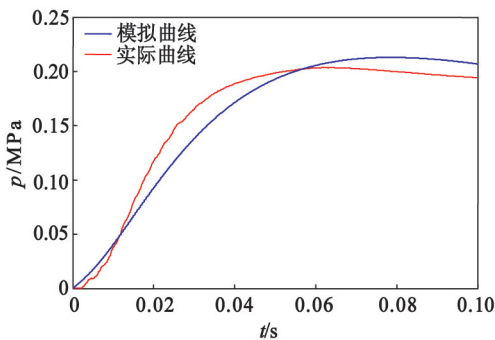


图 3 压力罐罐压试验曲线与模拟曲线对比
Fig.3 Comparison of simulated tank curve and experimental curve

压力-时间曲线达到其峰值之后,由于气体发生剂燃面减小而产生的减面燃烧,压力开始回落。

内压曲线的峰值点为燃烧室中气体压力最大值,也是燃烧室中气体压力与压力罐中气体压力差值最大的点,由于燃烧室中气体发生剂的燃烧速率与气体压力成正比,因此,该点也是气体发生剂燃烧速率最大的点。由于气体的流速与气体发生器内外压力差成正比,因此,该点即是气体发生器向压力罐释放气体速率最大的点(气体发生器向压力罐提供质量及能量综合效益最大的点),此时压力罐压力远小于燃烧室压力(其比值一般小于 0.05),也是压力罐中气体压力上升速率最大的点。对比内压和外压曲线,模拟结果符合以上分析,内压曲线峰值点就是罐压曲线上升速率最大的点。模拟曲线与试验曲线有误差,可能是利用密闭爆发器试验计算出的燃速与实际情况有所差异造成的^[12-15]。

2.2 过滤网出口处温度变化曲线

由图 4 可以看出,由于点火能量和气体发生剂的燃烧产生的能量,燃烧室温度迅速升高,过滤网出口气体温度为 900 K 左右。然而,试验测得气体发生剂的燃温要大于 2 000 K,由此可以看出,过滤

网不仅仅可以过滤燃气中固体残渣,还可以显著地降低发生器的出口燃气温度,避免了高温燃气烫伤乘客,造成不必要的伤害和可能性。

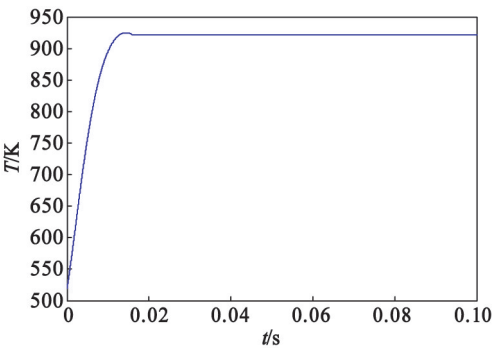


图 4 过滤网出口处气体温度
Fig.4 Gas temperature of filter exhaust

2.3 不同燃速气体发生剂内压曲线对比

由图 5 可以看出,当其他参数不变,燃速压力指数 n 从 0.552 变化到 0.752 时,随着燃速压力指数的增加,发生器达到最大内压的时间缩短,分别为 0.025、0.018 s 和 0.012 s,最大压力的值升高,分别为 14.0、21.2、27.6 MPa。这是由于假设气体发生剂密度和装药量相同,初始阶段相同压力条件下,相同时间内燃速越快,气体发生剂的已燃厚度就越大,产生的气体量就越多,导致燃烧室内压力越大、且压力上升得越快。但是,由于燃速快,气体发生剂燃烧表面积减少得也越快;由于燃烧面的减少,造成气体发生剂燃烧产生的气体量与排出燃烧室的气体量达到平衡的时间也就越早,因此,最大压力时间也就出现得越早。

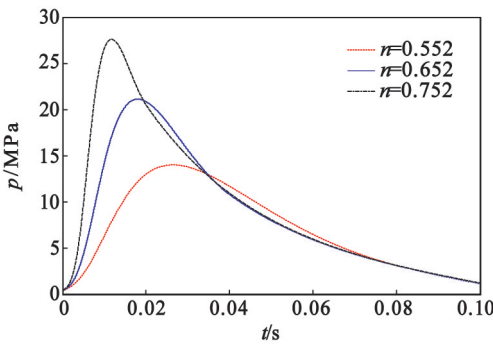


图 5 不同燃速内压曲线对比
Fig.5 Comparison of interior ballistic curves at different burning rates

2.4 不同厚度气体发生剂内压曲线对比

由图 6 可以看出,当其他参数不变,气体发生剂密度都相同,且直径都为 4 mm 的时候,采用厚度分别为 1.8、1.6、1.4 mm 的气体发生剂,发生器最大压力分别为 18.8、21.2、22.5 MPa,达到最大压力的

时间分别为 0.020、0.018、0.016 s。其他参数不变,气体发生剂厚度越小,发生器压力上升越快,压力曲线上升段斜率越高,最大压力越高,并且达到最大压力的时间越短。这是由于在装药量一定的情况下,气体发生剂厚度越厚,其相对比表面积就越小,初始的气体发生剂燃烧面积就越小,导致初始阶段产生的气体量减小,压力上升得就相对较慢一些。又由于厚度小的气体发生剂燃烧初始阶段压力上升得快,燃速又与压力相关,压力越大燃速越快,厚度较小的药就燃烧得更快,减面燃烧所导致的气体发生剂燃烧产生的气体量与排出燃烧室的气体量达到平衡的时间就会有所提前,所以达到最大压力的时间也会越快。

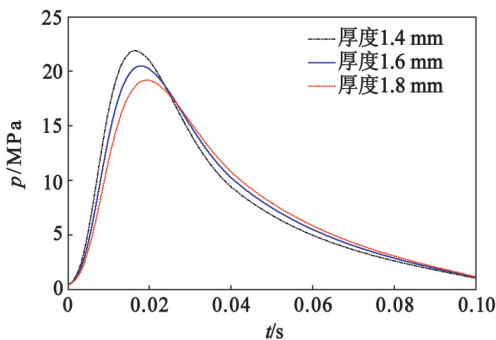


图 6 不同气体发生剂厚度内压曲线对比

Fig. 6 Comparison of interior ballistic curves with different thicknesses of gas generator

2.5 不同装药量内压曲线对比

由图 7 可以看出,当其他参数不变,气体发生剂装药量从 36 g 增加到 40 g 时,最大压力分别为 17.3、19.0、21.2 MPa,达到最大压力的时间分别为 0.024、0.020、0.018 s。其他参数不变,装药量越大,发生器压力上升得越快,最大压力越高,且达到最大压力的时间越短。这是因为在其他因素不变的条件下,装药量越大,初始的气体发生剂片数就越

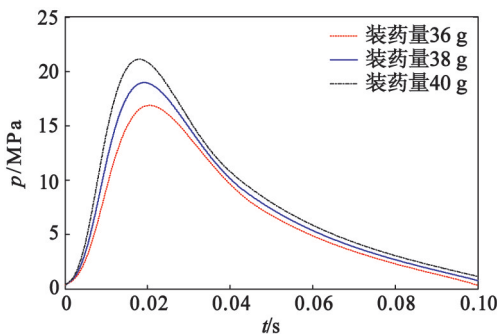


图 7 不同装药量内压曲线对比

Fig. 7 Comparison of interior ballistic curves with different charge mass of gas generator

多,初始的气体发生剂燃烧面积就越大,导致前段产生的气体量增多,压力上升较快,同时刻燃速也更快,气体发生剂燃烧得更快,减面燃烧所导致的气体发生剂燃烧产生的气体量与排出燃烧室的气体量达到平衡的时间也会越快,所以,达到最大压力的时间会越快。而由于装药量大,气体发生剂燃烧产生的气体量也就越多,最大压力也就越大。

2.6 不同排气孔面积大小内压曲线对比

由图 8 可以看出,当其他参数不变,当发生器排气孔直径为 2.4、2.6、2.8 mm 时,最大压力分别为 21.2、20.1、17.9 MPa,达到最大压力的时间分别为 0.018、0.020、0.022 s。其他参数不变,排气孔直径越大,初始压力上升得越慢,最大压力越小,且达到最大压力的时间越长。这是由于排气孔面积的增加,根据小孔流量公式,初始阶段排出燃烧室的气体质量增加,燃烧室内燃气质量减小,压力就越低,气体发生剂的燃速就越低,压力上升得也越慢;由于气体发生剂燃烧较慢,减面燃烧所导致的气体发生剂燃烧产生的气体量与排出燃烧室的气体量达到平衡的时间也会越慢,所以达到最大压力的时间也越慢;产气相对较慢且排气相对较多,导致了最大压力的降低。

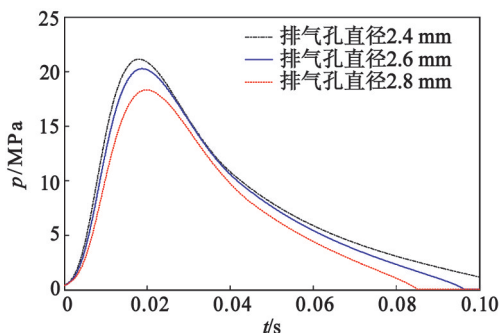


图 8 不同排气孔面积内压曲线对比

Fig. 8 Comparison of interior ballistic curves with different nozzle areas

3 结论

通过对烟火式气体发生器燃烧过程的数值模拟和试验研究,得到如下结论:

1)烟火式气体发生器的燃烧过程模型能够表征气体发生器的基本工作过程,程序模拟结果与试验结果符合得较好;

2)燃烧室内压力和温度上升很快,达到最大值后又迅速下降,而泄压罐由于容积较大且无气体排

(下转第 33 页)